Proposta de projeto híbrido de macrodrenagem cinza-verde-azul para controle de cheias urbanas na bacia do Itaocaia – Maricá-RJ

Hybrid gray-green-blue macro-drainage project proposal for urban flood control at Itaocaia basin – Maricá-RJ

Miguel Rego Tavares Silva [1]; Marcelo Gomes Miguez [2]; Osvaldo Moura Rezende [3].

[1]Granduando em Engenharia Civil | miguelrego.civil@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, RJ; [2]Doutor | marcelomiguez@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, RJ; [3]Doutor | omrezende@poli.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, RJ

Resumo:
O contexto recente de desenvolvimento econômico da cidade de Maricá-RJ contrasta com um crescimento urbano desordenado, que revela deficiências na infraestrutura de drenagem urbana, agravadas pela ocupação de margens fluviais e pela impermeabilização das bacias hidrográficas. Neste sentido, o presente trabalho propõe um projeto híbrido de macrodrenagem cinza-verde-azul na bacia do rio Itaocaia, conciliando soluções convencionais com abordagens sustentáveis, alinhadas ao Programa de Manejo de Águas Pluviais do município. A proposta inclui intervenções como dragagens de limpeza, reservatórios e parques lineares, visando destacar a multifuncionalidade e o conceito de infraestrutura cinza-verde-azul como eixos estruturantes do projeto. Utilizou-se o modelo hidrodinâmico MODCEL para simular diferentes cenários de projeto e avaliar o desempenho das soluções em termos de controle de cheias, regulação de vazões e redução de áreas alagadas. Os resultados demonstraram a eficácia das soluções integradas para a melhora da capacidade de transporte de vazões no exutório em até 67,8%. Os reservatórios e parques propostos foram capazes de amortecer os picos de vazões afluentes em até 65,2% e 46,9%, respectivamente, além de obter uma redução média de 0,96 m nas cotas de inundação ao longo do rio Itaocaia

Palavras-chave:
Drenagem Sustentável; Infraestrutura Cinza-Verde-Azul; Urbanização; Modelagem Hidrodinâmica

Abstract:
The recent economic development of the city of Maricá-RJ contrasts with a pattern of unplanned urban growth, which reveals deficiencies in stormwater infrastructure, further exacerbated by riverbank occupation and the impermeabilization of watersheds. In this context, the present study proposes a hybrid gray-green-blue macro-drainage project in the Itaocaia River basin, combining conventional engineering solutions with sustainable approaches, in alignment with the municipality's Stormwater Management Program. The proposal includes interventions such as channel dredging, retention reservoirs, and linear parks, aiming to highlight multifunctionality and the concept of gray-green-blue infrastructure as structuring elements of the project. The MODCEL hydrodynamic model was employed to simulate different project scenarios and assess the performance of the proposed solutions in terms of flood control, flow regulation, and reduction of inundated areas. The results demonstrated the effectiveness of the integrated solutions in improving flow conveyance capacity at the watershed outlet by up to 67.8%. The proposed reservoirs and parks were able to attenuate peak inflows by up to 65.2% and 46.9%, respectively, in addition to achieving an average reduction of 0.96 meters in flood levels along the Itaocaia River.

Keywords:
Sustainable Drainage; Grey-Green-Blue Infrastructure; Urbanization; Hydrodynamic Modelling

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência cada vez maior de desastres naturais, associados com as mudanças climáticas, mina a resiliência dos centros urbanos, que precisam, cada vez mais, de políticas públicas integradas e de investimentos em obras que busquem resistir, mitigar e se adaptar aos impactos desses eventos. Contudo, essa demanda se mostra ainda distante da maioria das cidades em países em desenvolvimento, onde se concentram mais de 90% das mortes e 60% das perdas econômicas associadas a eventos climáticos extremos entre 1970 e 2021 (ONU, 2023). No Brasil, apenas entre 2013 e 2023, os prejuízos causados por chuvas intensas somaram R$190,8 bilhões, sendo as regiões Sul e Sudeste as mais afetadas (CNM, 2023). Assim, os distúrbios econômicos e sociais causados por grandes eventos de cheias urbanas são significativos. Danos à infraestrutura e habitações, degradação do ambiente natural, propagação de doenças e perdas humanas se destacam entre as principais consequências causadas por estes fenômenos, se tornando fundamental a elaboração de projetos de drenagem que se adequem e integrem à caracterização física da bacia em questão (Miguez *et al.*, 2015).

No município de Maricá-RJ, o crescimento acelerado e a crescente arrecadação proveniente dos *royalties* da exploração do petróleo na região, contrastam com a precariedade da infraestrutura de saneamento local, especialmente em relação aos serviços de esgotamento sanitário e de drenagem e manejo de águas pluviais. Segundo dados da Autarquia de Serviços de Obras de Maricá (LAC-POLI/UFRJ, 2023), apenas 13,4% das vias públicas da cidade são atendidas por redes de drenagem cadastradas, o que expõe a população local a frequentes episódios de alagamentos. Além disso, a expansão urbana desordenada tem provocado impactos significativos no sistema hídrico, como a supressão de matas ciliares, o assoreamento de corpos hídricos e a redução da capacidade de infiltração do solo. Nesse contexto, o Programa de Manejo de Águas Pluviais – PMAP (LAC-POLI/ UFRJ, 2023) surge como uma iniciativa estratégica, ao propor diretrizes sustentadas no conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SBN) e na implantação de infraestruturas cinza-verde-azul.

As SBN representam uma abordagem promissora no enfrentamento das mudanças climáticas e na mitigação dos riscos hidrológicos urbanos. Ao promoverem a mimetização de processos naturais, essas soluções favorecem a regulação do ciclo hidrológico, o controle de cheias e a melhoria da qualidade da água, ao mesmo tempo em que proporcionam benefícios ecológicos e sociais. A integração entre infraestruturas verdes, azuis e cinzas é especialmente relevante em áreas urbanizadas, onde o espaço é limitado e a multifuncionalidade das soluções pode ampliar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de drenagem. Nesse sentido, destacam-se os parques urbanos multifuncionais, que combinam áreas verdes, reservatórios de retenção e espaços públicos, oferecendo alternativas mais resilientes e inclusivas para o controle de inundações.

O presente trabalho se insere nas discussões promovidas pelo Laboratório Água e Cidade (LAC/UFRJ), no âmbito da Cátedra UNESCO de Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Costeira, e propõe o desenvolvimento de um projeto híbrido de macrodrenagem na bacia do rio Itaocaia, em Maricá. Alinhado às diretrizes do PMAP, o projeto adota uma abordagem integrada que combina intervenções estruturais (como dragagens e reservatórios) e soluções sustentáveis de drenagem urbana, com o suporte do modelo hidrológico-hidrodinâmico MODCEL para simulação e avaliação de diferentes cenários. A proposta busca não apenas mitigar os efeitos das inundações, mas também promover a valorização ambiental, urbana e social da região estudada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Tucci (1997) destaca que a urbanização mal planejada é uma das principais causas de desastres urbanos associados a inundações. A substituição da vegetação por áreas impermeáveis reduz a evapotranspiração, diminui a infiltração e aumenta significativamente o escoamento superficial, antecipando os picos de cheia e gerando sobrecarga nos sistemas de drenagem, além de gerar aumento na produção de sedimentos e deterioração da qualidade das águas. A consequência é a intensificação dos eventos extremos e o agravamento de seus impactos. Segundo dados do *Center*

of Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), eventos hidrológicos extremos representam quase 50% dos desastres naturais ocorridos na América Latina no século XXI. Em bacias urbanizadas, a ocupação de áreas de várzea limita o amortecimento natural das cheias, contribuindo para perdas econômicas e sociais. A alteração do regime hidrológico afeta também a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos, além de comprometer a recarga dos aquíferos em períodos de estiagem. Assim, o aumento das vazões de pico e a redução do tempo de concentração das cheias são características dos hidrogramas dessas bacias, evidenciando a necessidade de estratégias sustentáveis de planejamento e gestão dos recursos hídricos urbanos (Woods-Ballard, 2015).

Assim, o manejo das águas pluviais e a drenagem urbana têm sido temas centrais nas discussões de desenvolvimento urbano. Com o avanço tecnológico, especialmente a partir do século XVIII, a drenagem urbana começou a se modernizar, incorporando novas técnicas e materiais, como o concreto, e desenvolvendo redes de drenagem mais eficientes, com diversas formas de seção e sistemas de tubulação. A drenagem urbana se tornou essencial para controlar os impactos das chuvas, prevenindo alagamentos, conduzindo esgotos para longe do contato com a população e preservando a infraestrutura das cidades, e evoluiu para conceitos como o da rede separadora e tratamento de águas residuais (Burian, 1999). Segundo o Marco Legal do Saneamento (Brasil, 2020) a drenagem urbana é o conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.

A microdrenagem trata do redirecionamento do escoamento superficial, para condutos pluviais, a fim de evitar o acúmulo de água em áreas urbanas, de forma distribuída, enquanto a macrodrenagem foca no controle dos escoamentos em nível de bacia hidrográfica, na macroescala, utilizando estruturas naturais ou antrópicas como rios, canais e condutos fechados de grande porte, para transportar a água até seu exutório. Contudo, Tucci (2003) critica a visão tradicional de drenagem que busca a remoção rápida das águas pluviais, na transferência do volume escoado para jusante, sem considerar os impactos na bacia como um todo. Em vez disso, é proposto que a drenagem urbana deva ser planejada com base em princípios que contemplem o aumento da vazão devido à urbanização, o zoneamento adequado de áreas ribeirinhas e a integração de medidas estruturais e não estruturais no planejamento urbano. O uso de obras estruturais e de medidas não estruturais no controle de enchentes é essencial para um manejo eficiente das águas pluviais, sendo que a combinação de ambos os tipos de medidas contribui para a sustentabilidade e resiliência das cidades frente aos eventos climáticos extremos.

Assim, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN's) se tornam componentes essenciais para alcançar a resiliência e a sustentabilidade em um contexto de aumento dos eventos hidrológicos extremos. As ações se inspiram, suportam ou mimetizam sistemas complexos naturais, e visam resolver problemas urbanos e antrópicos de maneira adaptativa, utilizando recursos naturais de forma eficiente (Fraga, 2020), oferecendo serviços urbanos e ambientais conjuntamente. A aplicação das SBN's na gestão de bacias hidrográficas pode reduzir o risco de inundações e melhorar a qualidade da água. A restauração de planícies de inundação e recuperação de áreas degradadas trazem benefícios adicionais, como o sequestro de carbono, proteção contra enchentes e aprimoramento das paisagens urbanas. (European Comission, 2015). Nesse sentido, os Sistemas de Drenagem Sustentável (SDS) surgem como alternativas que buscam replicar as condições originais da drenagem natural local, promovendo a infiltração e controle de águas pluviais, o que favorece a preservação da biodiversidade local e oferece benefícios ecológicos e sociais, embora demandem manutenção frequente e possam apresentar custos elevados em algumas implementações (Poleto e Tassi, 2012).

Por isso, a infraestrutura cinza-verde-azul incorpora conceitos de drenagem urbana convencional e sustentável, promovendo soluções multifuncionais que integram vegetação, corpos d'água e sistemas hídricos para o manejo das águas pluviais. A infraestrutura verde traz a valorização da vegetação urbana e dos espaços verdes, enquanto a infraestrutura azul se concentra nos corpos d'água e outros sistemas hídricos. A junção dos dois conceitos forma uma rede interconectada de áreas verdes e espaços livres que visam conservar os valores e funções dos ecossistemas naturais.

(Benedict *et al.*, 2006; Macedo *et al., 2022*). No presente trabalho, a macrodrenagem associada ao conceito conjunto de Infraestrutura Verde Azul (IVA) traduz-se em sistemas de retenção e armazenamento com uso social, que destacam a multifuncionalidade ao integrar a gestão de recursos hídricos com benefícios ambientais e sociais nas soluções de engenharia. As soluções são projetadas na escala da bacia, de forma a garantir a continuidade dos fluxos ecológicos, enquanto ordena os escoamentos superficiais durante as cheias, mitigando problemas de inundações. Sob essa perspectiva, o solo pode atender a mais de um propósito e satisfazer várias necessidades simultaneamente e, em uma mesma área, é possível promover de forma simultânea e benéfica funções-chave no âmbito da ecologia, economia, sociocultural e estética (Miguez *et. al*, 2024).

Para o desenvolvimento do trabalho, a modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta indispensável para a compreensão e previsão do comportamento de sistemas de escoamento em ambientes urbanos, especialmente no contexto da gestão de cheias. No caso específico da drenagem urbana, a escolha entre modelos unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) ou Quasi-2D depende da complexidade do sistema analisado. Modelos 1D representam o escoamento ao longo de canais e galerias e são úteis em projetos onde o escoamento é confinado. Contudo, em áreas planas suscetíveis a inundações, os modelos 2D, que consideram a topografia em duas dimensões, são mais indicados, embora exijam maior capacidade computacional (Leandro *et al.*, 2016; Miguez, 2017). Os modelos Quasi-2D, então, surgem como alternativa intermediária, ao representar o escoamento por meio de células interligadas hidraulicamente por leis unidimensionais. Essa abordagem permite capturar os efeitos de obstáculos e variações na superfície de escoamento com boa precisão e menor custo computacional (Souza, 2018).

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar a metologia e as ferramentas necessárias para o desenvolvimento do trabalho. A ferramenta de simulação adotada foi o Modelo de Células de Escoamento - MODCEL (Miguez e Mascarenhas, 2001), um modelo hidrodinâmico Quasi-2D voltado à representação do escoamento em áreas urbanas, por meio da subdivisão da bacia em compartimentos homogêneos, que interagem entre si através de ligações que buscam simular padrões de escoamento superficial na bacia. A construção da malha de células e o domínio de modelagem envolve a caracterização topográfica e hidráulica do território, considerando a delimitação das áreas de armazenamento, direções preferenciais de escoamento e presença de infraestrutura urbana que interfere na dinâmica hidrológica local. A fidelidade da simulação está diretamente relacionada à adequada definição dos limites das células e de suas conexões, que seguem leis hidráulicas unidimensionais e refletem a interação entre os diferentes elementos do espaço urbano modelado

Além disso, para subsidiar a modelagem hidrodinâmica supracitada, realizou-se a caracterização física e hidrológica da bacia do rio Itaocaia por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com o uso do *software* QGIS. A ferramenta possibilitou o armazenamento, manipulação e análise de dados geoespaciais, viabilizando a criação da malha de células homogêneas para a modelagem Quasi-2D, com base em dados topográficos recebidos pelo corpo técnico do LAC-COPPE/ UFRJ. Com isso, foram utilizadas camadas vetoriais do tipo polígono, linha e ponto para definir, respectivamente, os limites das células, suas conexões hidráulicas e os centros de escoamento. Complementarmente, dados sobre infraestrutura urbana, como arruamento, redes de microdrenagem, uso e ocupação do solo, foram incorporados à análise para representar adequadamente as condições de infiltração e drenagem da bacia.

3.2. ESTUDO DE CASO

A Figura 1 apresenta o mapa de localização da bacia de estudo. Situada na porção mais à oeste do município de Maricá, a bacia faz parte do 4° distrito de Itaipuaçu, e engloba os bairros do Itaocaia

Valley, Morada das Águas, Rincão Mimoso, Barroco, Praia de Itaipuaçu e Recanto de Itaipuaçu onde habitam cerca de 18.250 pessoas, segundo dados censitários do IBGE (2022). A bacia possui área de drenagem, com 15,7 km², e seu talvegue principal possui aproximadamente 9,5 km de extensão. O exutório da bacia se dá no Canal da Costa, que conduz suas águas até a foz no Oceano Atlântico. Sua maior parte apresenta relevo considerado plano, com declividades que se aproximam de zero já na planície costeira, em épocas de chuva, as águas pluviais concentram-se rapidamente nas áreas planas favorecendo as inundações urbanas.

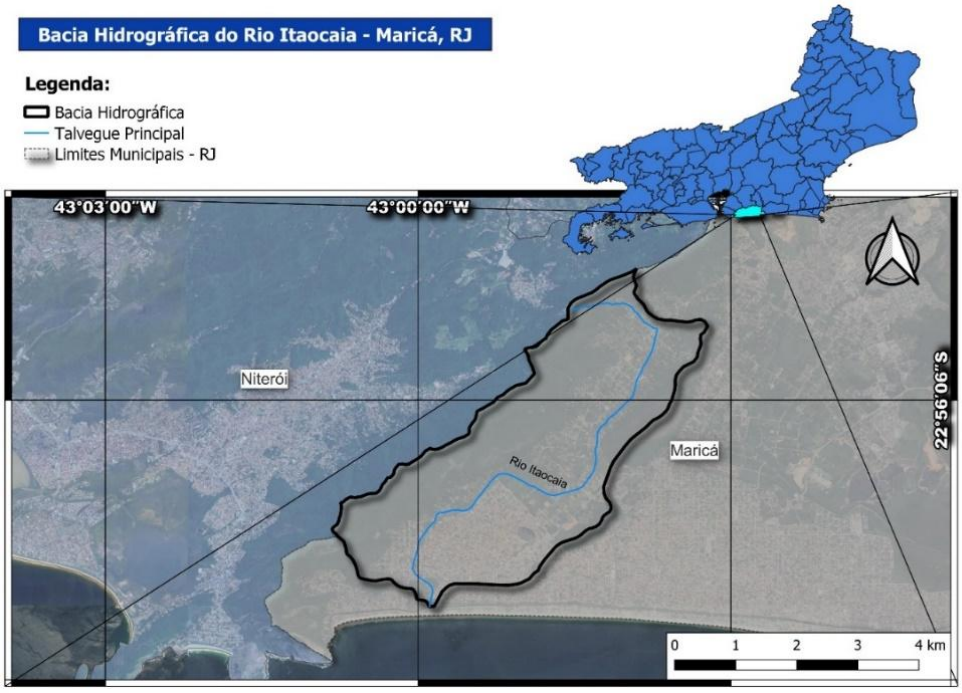


Figura 1: Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Itaocaia.

A determinação da chuva de projeto a ser incorporada no modelo foi feita a partir da caracterização pluviométrica da região. Dessa maneira, em consulta ao sistema do HIDROWEB da ANA (2025) o posto pluviométrico Manuel Ribeiro, de código 02242010, foi escolhido para a análise, considerando uma série histórica de registros extensa com 51 anos de dados diários completos. A partir dos dados de chuvas diárias observados no posto selecionado, foi realizado um ajuste estatístico utilizando o Método de Gumbel, aplicado aos valores de chuva máxima diária anual da série de dados existente e, em posse dos fatores de desagregação do Manual de Projeto de Drenagem Urbana (DAEE/CETESB, 1979), foi possível produzir curvas de Intensidade-Duração-Frequência (I-D-F) por meio de regressão linear para caracterizar as chuvas intensas, assim:

$$i = \frac{1.452{,}92 \times TR^{0{,}221}}{(t + 11{,}825)^{0{,}757}}$$

Em que:
t- Tempo de duração da chuva (min);
i- Intensidade da chuva (mm/h);
TR- Tempo de recorrência (anos).

3.3. CENÁRIOS DE PROJETO

A partir da caracterização e o resultado dos estudos hidrológicos realizados anteriormente, foi feita a modelagem computacional das propostas de intervenção de na bacia. Vale destacar que a malha básica de células, contendo as condições atuais da bacia, foi desenvolvida e distribuída pelo corpo

técnico do Laboratório Água e Cidade (LAC/COPPE/UFRJ) como parte do trabalho de pesquisa para o desenvolvimento do Programa de Manejo de Águas Pluviais (PMAP) de Maricá, e subsidiou a elaboração do presente trabalho. A calibração do modelo básico utilizou como dados de entrada os registros de precipitações disponíveis no sistema de alerta do CEMADEN-RJ (postos pluviométricos 330270006A e 330270005A), no dia 29 de fevereiro de 2016. Foram utilizadas informações sobre locais que sofreram alagamentos e inundações durante este evento, com a verificação de registros visuais e estimativa de níveis d'água nestes pontos críticos para a comparação com os níveis d'água resultantes da simulação. Assim, validando a representação da bacia modelada a partir do ajuste de parâmetros como coeficientes de escoamento e rugosidade. Além disso, o modelo conta com uma condição de contorno à jusante, que diz respeito ao nível médio da maré na praia de Itaipuaçu, fixado em 0,60 m.

O primeiro cenário (Cenário 1) de intervenção consistiu na dragagem da calha principal do rio Itaocaia, com o objetivo de aumentar sua capacidade de transporte e melhorar as condições de escoamento. A modelagem foi traduzida por meio do rebaixamento das cotas de fundo das células de canal em até 2,0 metros ao longo de uma extensão de 9,44 km, que compreende toda a extensão do Rio Itaocaia, seu deságue no Canal da Costa e a foz no Oceano Atlântico, resultando em um volume estimado de 162,2 mil m³ de material dragado. Além disso, foram ajustados os coeficientes de rugosidade de Manning e as larguras das ligações, de modo a evitar estrangulamentos e melhora o desempenho hidráulico com a calha limpa.

Em seguida, o Cenário 2 da proposta incluiu a criação de um reservatório de retenção junto à Lagoa da Costa Verde, localizada na região do Taboal, integrado a um parque multifuncional. Atualmente, a região sofre com um histórico de assoreamento que acarretou a redução drástica de sua área e o desaparecimento da lâmina d'água. A sua recuperação passa pela criação de áreas de armazenamento temporário. O sistema foi modelado com três patamares de armazenamento, otimizando o uso da área para diferentes intensidades de chuva, totalizando um volume útil de 292,19 mil.m³. Além de regularizar as vazões à jusante, a proposta resgata o espelho d'água da lagoa e viabiliza um espaço público multifuncional com áreas de lazer, fortalecendo a integração socioambiental e contribuindo para a valorização urbana da região.

Por fim, para o Cenário 3, foi concebido um parque linear multifuncional ao longo de 2,7 km do trecho mais à jusante do rio. As novas áreas inseridas na simulação representam calhas secundárias rebaixadas em relação ao leito principal, contendo um volume útil de 288,9 mil.m³, o que oferece maior área de seção transversal para escoamento da cheia (como uma calha secundária), aliada a uma capacidade adicional de armazenamento e amortecimento em calha, durante eventos extremos, sem afetar a malha urbana próxima existente. O projeto respeita a faixa marginal de proteção e evita a desapropriação de loteamentos consolidados, atuando como área de amortecimento das inundações e oferecendo, nos períodos de estiagem, um espaço qualificado com infraestrutura verde, vias públicas e mobiliário urbano. A simulação dos cenários ocorre de maneira cumulativa, ou seja, a partir da sobreposição sequencial dos cenários de projeto. Assim, a combinação das três intervenções compõe a proposta final do Parque Fluvial do Itaocaia. O arranjo geral do projeto pode ser observado na Figura 2.

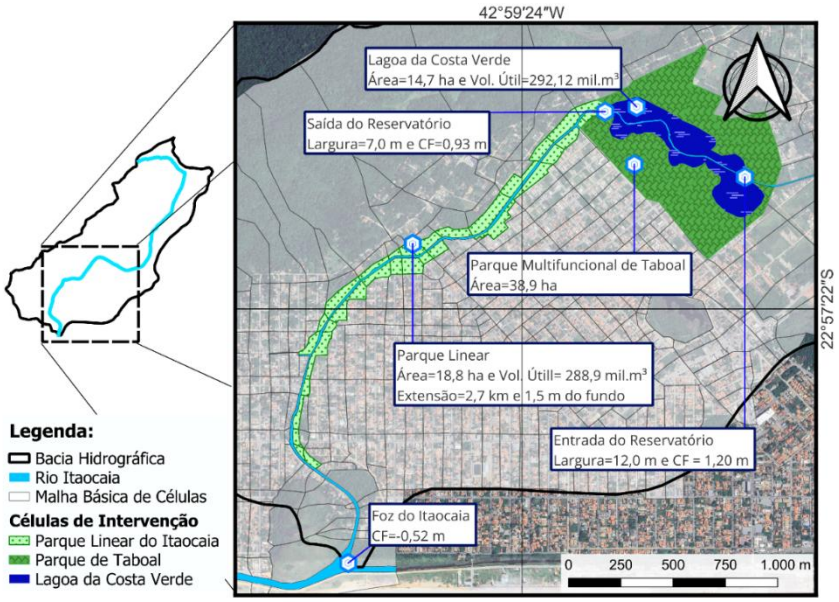


Figura 2: Arranjo geral do Parque Fluvial do Itaocaia

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta o hidrograma comparativo entre os quatro cenários de projeto, na foz da bacia. A sua observação mostra que a inserção do parque fluvial favoreceu a melhora do amortecimento do pico de vazão na sua saída para o Canal da Costa. As condições atuais da bacia apresentam um hidrograma achatado, com vazão de pico de 17,73 m³/s e recessão de cerca de 20h, caracterizando um enorme amortecimento sem controle, que está ocorrendo nas ruas e estruturas urbanas (de forma indesejável). O Cenário 1, com a introdução da dragagem, apresentou a recuperação da capacidade de descarga do canal, junto com o aumento do pico de vazão, encontrando 46,47 m³/s devido à melhora das condições de escoamento, um aumento de 2,6 vezes em relação à situação original de partida. A implementação dos reservatórios do Parque da Lagoa da Costa Verde, no Cenário 2, amorteceu o pico de vazão visto no modelo anterior, com uma redução de 21,67% para 36,40 m³/s. Por fim, com 29,71 m³/s, o Cenário 3 apresentou uma redução de 18,4% em relação à etapa anterior do projeto. Mesmo assim, a vazão se mostrou 67,59% mais elevada em relação às condições atuais de escoamento, evidenciando a capacidade do sistema em manter a regularizadas as vazões com o aproveitamento da calha secundária do rio, sem extravasamento da calha principal.

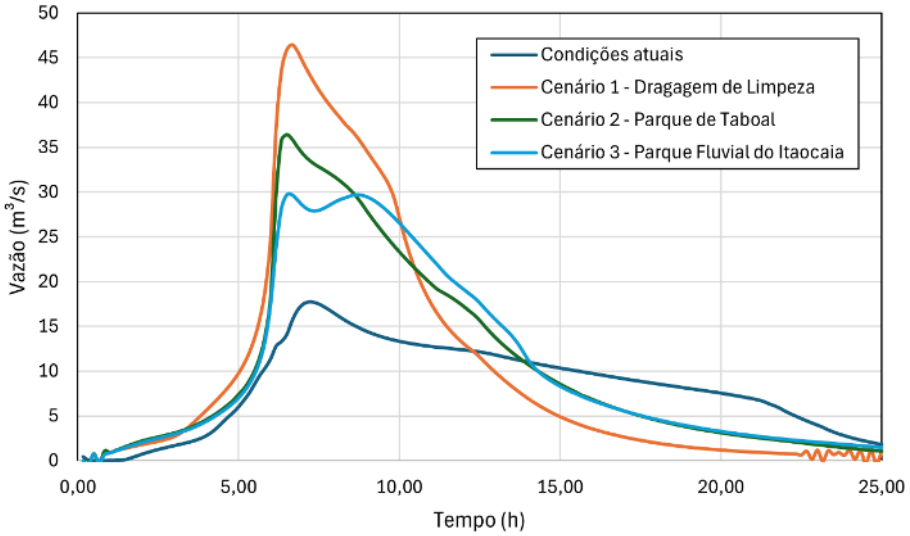


Figura 3: Hidrograma comparativo – Foz do Rio Itaocaia

A Figura 4 apresenta o gráfico comparativo entre os hidrogramas afluentes e efluentes resultantes da implementação das intervenções no Parque de Taboal e do Parque Linear, levando em consideração o modelo com a proposta completa no Cenário 3.

A análise do reservatório em Taboal, mostra um pico de 45,13 m³/s em 6,5 h de evento hidrológico, considerando a vazão que chega pela calha principal do rio. Além disso, considera-se a contribuição lateral proveniente das células marginais que contribuem para a área de armazenamento, formando o reservatório de amortecimento. Estas vazões, somadas ao que chega pelo canal de montante, atingem um pico de 61,14 m³/s no hidrograma afluente. O amortecimento da onda de cheia ocorre com vazões efluentes que atingem 21,28 m³/s em 8,17 h, o que mostra a capacidade do sistema em retardar e reduzir o pico de vazão à jusante em até 65,2%, aumentando o tempo de recessão da cheia.

Em seguida, o hidrograma de projeto do Parque Linear, mostra que a soma das vazões afluentes, considerando a saída do reservatório de Taboal, apresentado anteriormente, e as contribuições marginais ao longo da extensão do rio, atingiu um pico de 55,33 m³/s em 6,17 h de evento hidrológico. O controle de saída, feito a partir do estrangulamento da seção de escoamento do rio, resultou no amortecimento do pico em 46,9% obtendo uma vazão de 29,38 m³/s em 8,67 h, se mostrando eficaz no retardo da cheia em até 2,5 h.

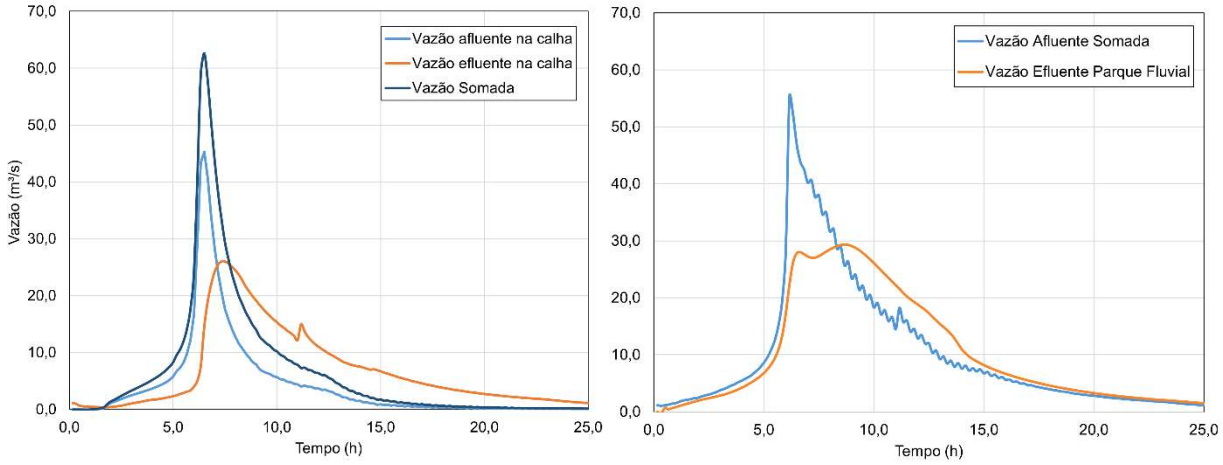


Figura 4 – Hidrogramas afluentes e efluentes – Reservatório de Taboal (esquerda) e Parque Linear (direita)

A análise da Figura 5, para um tempo de simulação de cerca de 25h, permite confirmar a redução gradual dos níveis d'água máximos com as melhoras na condição do escoamento. O Cenário 1 apresentou resultado expressivos na região de montante do Parque de Taboal, obtendo uma redução média 1,65 m nos seus 3 km iniciais, o que evitou extravasamentos no trecho. Entretando, a mesma região sofreu pouco impacto das intervenções nos cenários subsequentes, apresentando pouca ou nenhuma variação nos primeiros 3 km do rio Itaocaia, em ambos cenários 2 e 3.

Além disso, os Cenários 1 e 2 foram os que impactaram de forma mais significativa os níveis d'água no rio. A primeira intervenção obteve uma redução média de 0,59 m nas cotas de inundação, em seguida, a implementação do Parque de Taboal alcançou os 0,88 m de variação média, um aumento de eficácia de 47,9% que evitou o espraiamento da mancha de inundação na região do Taboal. O modelo do Parque Fluvial do Itaocaia, por sua vez, foi capaz de reduzir as cotas de cheia um pouco mais, para um valor médio de 0,96 m, o que configura um aumento de 9,0% de eficácia em relação ao modelo anterior. Apesar de menor, esta redução complementar dos níveis permitiu o controle do escoamento dentro da calha projetada, evitando seu extravasamento e contato com a malha urbana do entorno. Destaca-se também que a readequação da Obra de Arte Especial (OAE) existente

próximo à foz do Canal da Costa, que causava estrangulamento na seção e elevações do nível d'água à montante do rio no modelo inicial, evitou gargalos na saída do sistema e contribuiu para a melhora do escoamento no rio Itaocaia, sobretudo no seu trecho mais à jusante.

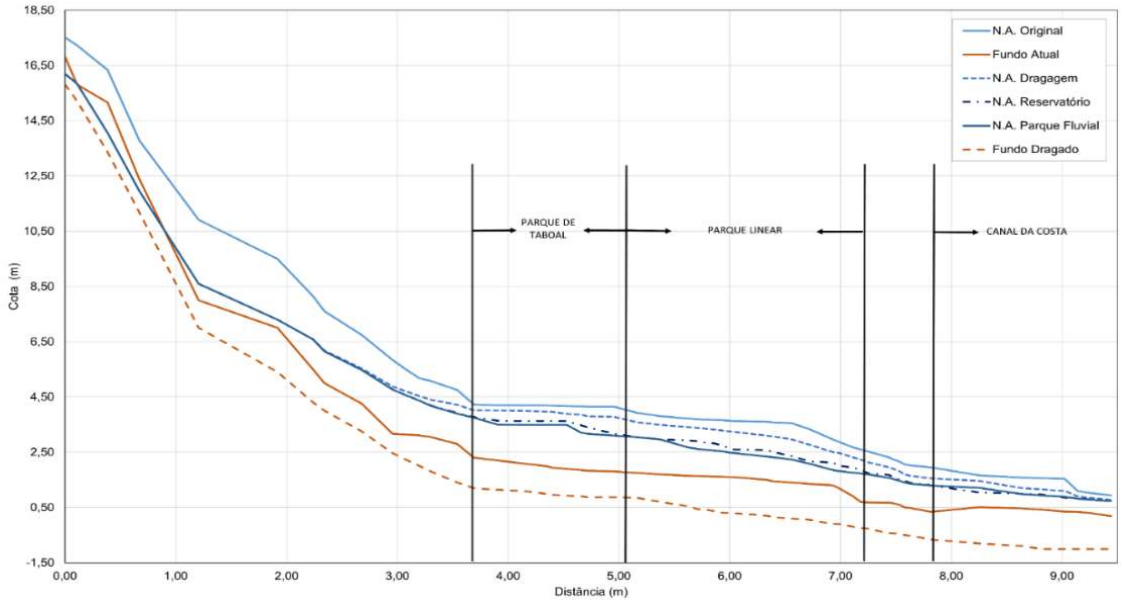


Figura 5 – Comparação dos perfis de linha d'água máximos para cada intervenção.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou propostas de macrodrenagem voltadas ao manejo sustentável das águas pluviais urbanas na bacia do rio Itaocaia, em Maricá-RJ. A adoção de soluções híbridas, integrando infraestrutura cinza-verde-azul, demonstrou ser eficaz na mitigação de inundações e na promoção da resiliência climática, ao mesmo tempo em que contribui para a valorização dos espaços urbanos e a melhoria da qualidade de vida. As Soluções baseadas na Natureza (SbN), aplicadas por meio da criação de áreas de armazenamento, infiltração e lazer, reforçaram o potencial dessas estratégias na recuperação de ecossistemas e no controle de cheias.

A modelagem hidrodinâmica realizada com o software MODCEL permitiu analisar criticamente o comportamento hidrológico da bacia, identificando regiões mais suscetíveis a alagamentos. A dragagem da calha principal melhorou significativamente as condições de escoamento, desde as áreas mais altas da bacia, mas revelou limitações para conter as cheias em regiões de menor declividade. Nesse contexto, a recuperação da Lagoa da Costa Verde, por meio da implantação do Parque de Taboal e de um reservatório de retenção, mostrou-se fundamental no amortecimento das vazões de pico em 65,2 % e na mitigação dos impactos à jusante, mesmo na persistência de alagamentos pontuais.

Por fim, a implementação de um parque linear multifuncional complementou a estratégia de macrodrenagem, atuando como calha secundária para o amortecimento das cheias em até 46,9%, sem comprometer áreas urbanizadas. Os resultados evidenciam o potencial das infraestruturas híbridas como ferramentas de requalificação urbana, contribuindo para a construção de comunidades mais resilientes, tendo em vista a contenção do escoamento na calha projetada ao longo de todo o projeto. Os hidrogramas no exutório da bacia, para os cenários simulados, mostram o aumento da capacidade da calha, e o amortecimento dos picos de vazão, conforme implementadas as intervenções, evidenciando que a valorização dos corpos hídricos e a recuperação de áreas degradadas na bacia do Itaocaia configuram-se como referências replicáveis para políticas públicas sustentáveis em outras regiões de Maricá.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao. Acesso em 10 jan. 2025.

BENEDICT, M. A. et al. Green infrastructure: linking landscapes and communities. **Island Press**, Washington, Estados Unidos, 2012.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.036, de 11 de maio de 1990, e nº 8.666, de 21 de junho de 1993; e dá outras providências. Atualizada pela Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 4, p. 1, 8 jan. 2007.

BURIAN, S. J.; NIX, S. J.; DURRANS, S. R.; PITT, R. E.; FAN, C. Y.; FIELD, R. Historical development of wet-weather flow management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 125, n. 1, p. 3-13, 1999.

CNM – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS**. Panorama dos Desastres no Brasil – 2013 a 2023.** Brasília, Brasil: CNM, 2023.

CRED – Center for Research on the Epidemiology of Disasters. **EM-DAT - The international disaster database**. Louvain, Bélgica, 2025. Disponível em: https://www.emdat.be/. Acesso em 14 set, 2024.

DAEE/CETESB. **Drenagem Urbana, Manual de Projeto**, Departamento de Águas e Energia Elétrica e Companhia de Tecnologia de Saneamento, São Paulo, Brasil, 1979.

EUROPEAN COMISSION. **Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the horizon 2020 expert group on 'nature-based solutions and re-naturing cities**. Climate Action, Environment, Resource Efficiency and Raw Materials. Bruxelas, Bélgica, 2015.

FRAGA, R. G.; SAYAGO, D. A. V. Soluções baseadas na Natureza: uma revisão sobre o conceito. **Parcerias Estratégicas**, v. 25, n. 50, p. 67-82, 2020.

IBGE. **Censo Demográfico 2022**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2022.

LAC-POLI/UFRJ. **Programa de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Município de Maricá - PDMAP-Ma**r. Laboratório Água e Cidade da Escola Politécnica da UFRJ / Lázarus Engenharia. Rio de Janeiro, 2023.

LEANDRO, J.; SCHUMANN, A.; PFISTER, A. A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 356-365, 2016.

MACEDO, L. S. V.; BELLEZONI, R. A.; OLIVEIRA, J. A. P.; SALEHI, P.; CURRIE, P.; JONES, A. **Innovating in urban green and blue infrastructure to improve the food-water-energy nexus: an implementation guide for cities and subnational governments**. FGV EAESP CEISA e ICLEI. São Paulo, Brasil. 2022.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. Urban flood simulation using MODCEL—An alternative quasi-2D conceptual model. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 6, 2017.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Elsevier Brasil, 2015.

MIGUEZ, M. G.; GOMES, M. V. R. ; AMBACK, B. C. ; MELLO NETO, H. ; THOMAZ, F. R. ; MATTOS, R. R. ; VERÓL, A. P. ; Sousa, M. M. ; REZENDE, O. M. ; MAGALHAES, P. C. . Conceptual framework to incorporate drainage solutions in the urban open space system. **Frontiers In Water**, v. 6, p. 1, 2024

MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B.; MAGALHÃES, L. P. C. Multifunctional landscapes for urban flood control in developing countries. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 84, 2025

ONU – Organização das Nações Unidas. **90% das mortes por desastres naturais ocorreram em países em desenvolvimento.** ONU News, 2023.

POLETO, C.; TASSI, R. Sustainable urban drainage systems. **In: Drainage Systems**, p. 55-72, Curitiba, Brasil. 2012.

SOUSA, M. M. **Avaliação Comparativa de Metodologias de Modelagem Hidráulica 2D e seu Impacto na Interpretação e Avaliação de Ondas de Cheia**. Dissertação de Mestrado (Programa de Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH),** v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (org). **Inundações urbanas na América do Sul**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Brasil. 2003

WOODS-BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R.; SHAFFER, P. **The SUDS manual**. CIRIA. Londres, Reino Unido. 2007.